

УДК 621.396.1

І.Р. Пархомей, Ю.К. Степаненко

## **ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ НВЧ-СИГНАЛУ З КРИСТАЛІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ РАДІОПОГЛИНАЮЧОГО ДІЕЛЕКТРИКА**

*Анотація:* Пояснюється фізична суть та дається математичне обґрунтування процесу радіопоглинання, що протікає при опромінюванні радіопоглинаючого матеріалу надвисокочастотним електромагнітним сигналом, а також ефекту підсилення та згасання перевипромінюваного сигналу.

*Ключові слова:* радіопоглинаюче покриття, радіолокаційна інформація, резонанс, сигнал.

### **Вступ**

Сучасні технології, які застосовуються як у радіолокації, так і в інших галузях прикладної науки розроблюються за принципом використання частотних діапазонів таких енергетичних випромінювань, як монохроматичне лазерне випромінювання. Використання зазначених видів випромінювання пов'язане зі значним прогресом у галузі розробки приймально-передавальних систем та мікроелектроніки. Лазерні системи та локатори вирішують великий перелік проблем, що існували в радіолокації, а саме: точність визначення координат матеріальних об'єктів та виявлення та супроводження малорозмірних повітряних об'єктів або літальних апаратів зі штучно зниженою площею віддзеркалення. Слід зазначити, що використання специфічних енергетичних випромінювань має суттєві обмеження їх практичного застосування з причини ефектів істотного затухання випромінювання у навколишньому повітряному середовищі.

Випромінювання можуть бути використані при вирішенні такої актуальної проблеми, як виявлення та супроводження літальних апаратів зі штучно зниженою площею віддзеркалення на основі розробки та впровадження нетрадиційних методів радіолокації.

Метою статті є математичний опис фізичної моделі взаємодії електромагнітного поля з кристалічною структурою радіопоглинаючих діелектриків.

### **Основна частина**

Як відомо [1], штучне зниження ефективної поверхні віддзеркалення сучасних літальних апаратів проводиться декількома шляхами, але найбільшу ефективність проявляють інтерференційні (Салісбері) та дифракційні (Даленбаха) екрани. Принцип дії екрана Даленбаха оснований на поступовому поглинання енергії сигналу в радіопоглинаючих

---

© І.Р. Пархомей, Ю.К. Степаненко, 2012

шарах, електрична та магнітна проникливість яких поступово збільшується. Екран Салісбері забезпечує багаторазове перевипромінювання падаючої електромагнітної хвилі. Таким чином віддзеркалений сигнал втрачає свою потужність до рівня, який не дозволяє здійснювати стійке виявлення об'єктів з такими поверхнями існуючими радіолокаційними станціями (РЛС).

В практиці не існує матеріалів, які повністю поглинають або віддзеркалюють електромагнітну енергію, що падає на їх поверхню. Не зустрічається також абсолютно радіопрозорих речовин.

Тому всі існуючі тіла характеризуються наступними коефіцієнтами:  $\alpha$  – поглинання,  $\rho$  – віддзеркалення і  $\tau$  – перепускання. Співвідношення цих коефіцієнтів описується законом Бугера-Ламбера [2]:

$$\alpha\omega + \rho\omega + \tau\omega = 1, \quad (1)$$

Вирішення проблеми виявлення повітряних об'єктів, в першу чергу, пов'язане коефіцієнтом віддзеркалення для розглянутих вище екранів. Для екрана Деленбаха він складає 0.013, для екрана Салісбері 0.026. Тобто, у літальних апаратів зі штучно зниженою площею віддзеркалення технологія поглинання опромінюючих сигналів базується на зниженні коефіцієнту віддзеркалення з одночасним підвищенням коефіцієнтів поглинання та перепускання в певному діапазоні частот ефективною роботи РЛС. Вказані коефіцієнти мають пряму залежність від довжини хвилі сигналу опромінення, тобто від його частоти:

$$\rho = 1 - \lambda T, \quad (2)$$

де:  $\lambda$  – довжина хвилі;

$T$  – температура речовини.

Відповідно до формули, що була отримана Планком для визначення спектральної щільності віддзеркаленої енергії

$$r_\lambda = \frac{2\pi h \omega^3}{V^2} e^{-\frac{h\omega}{\rho T}}, \quad (3)$$

де:  $r_\lambda$  – спектральна щільність віддзеркаленої енергії;

$h$  – постійна Планка;

$\omega$  – частота сигналу опромінення;

$V$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль;

та враховуючи жорстку залежність коефіцієнтів у (1, 2) від частоти, енергія віддзеркаленого поля визначиться як

$$E = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda, \quad (4)$$

Аналіз зазначених залежностей дозволяє стверджувати, що проблема підвищення радіолокаційної скритності вирішується за рахунок підбору властивостей радіопоглинаючих матеріалів для покриття поверхні

літальних апаратів з метою поглинання електромагнітних сигналів у найбільш ймовірному діапазоні частот застосування РЛС виявлення та супроводження.

Свого часу, можливість виявлення літальних апаратів зі штучно зниженою площею віддзеркалення спростовувалась, оскільки існуючі методи первинної та вторинної обробки радіолокаційної інформації ґрунтуються на силовій боротьбі відповідно до основної формули радіолокації: більша імпульсна потужність передавача забезпечує більшу дальність дії РЛС і більшу енергетику віддзеркаленого сигналу. Але це правило не спрацьовує у випадку, коли практично вся енергія сигналу опромінення поглинається або перетворюється в інші види енергії на інших частотних діапазонах (наприклад, теплову). Тому для звичайних когерентних РЛС, де велике значення має кореляція випроміненого і прийнятого сигналів, ефективна протидія літальним апаратам зі штучно зниженою площею віддзеркалення стає неможливою.

Узагальнюючи досвід функціонування існуючих РЛС щодо виявлення літальних апаратів зі штучно зниженою площею віддзеркалення, можливо констатувати, що існуючі методи радіолокації не ефективні і не можуть бути удосконалені. Ці методи потребують корінних змін в принципах локації. Концептуально літальний апарат зі зниженою ефективною поверхнею віддзеркалення (ЕПВ) може бути виявлений, якщо він сам буде випромінювати електромагнітну енергію (на виявленні радіообміну засобів зв'язку), але на це не слід розраховувати.

Рішенням даної проблеми може стати випадок, коли власне випромінювання буде спровоковане сигналом надвисокої частоти (НВЧ), який вступить у резонансну взаємодію з коливаннями кристалічної структури радіопоглинаючого матеріалу, яким вкритий літальний апарат.

Для обґрунтування фізико-математичних основ взаємодії електромагнітної хвилі з елементарними частинками кристалічної структури радіопоглинаючого діелектрика пропонується кристалічна фізична модель довільної радіопоглинаючої речовини (наприклад вуглець):

Елементарним частинкам притаманна властивість здійснювати невимуснені енергетичні коливання  $E(t)$ , які амплітудно модульовані внаслідок перерозподілу енергії між ними. Це явище забезпечує нейтральність речовин, що спостерігається в побуті. Для аналітичного аналізу радіопоглинаючої речовини його кристалічну структуру можливо уявити у вигляді ланки коливальних контурів з розосередженими параметрами еквівалентних індуктивностей  $L$  та ємностей  $C$  з передавальною функцією  $W(p)$

$$W(p) = \frac{K}{T_e^2 p^2 + T_e^\xi p + 1}, \quad (5)$$

де:  $p$  – оператор Лапласа;

$T$  – постійна часу;

$\xi$  – декремент затухання;

$K$  – еквівалентний коефіцієнт передачі.

З теорії автоматичних систем відомо, що коливальна система має обмежені запаси стійкості і при збудженні на певній частоті здатна до генерації автоколивань. Зовнішнє електромагнітне поле НВЧ-коливань з частотою невимушених коливань атомів кристалічної структури речовини призводить до резонансного перерозподілу енергії у прикордонному шарі речовини (виникнення аномального скін-ефекту). Аналіз формули (5) і врахування хвильового характеру взаємодії дозволяє сформулювати умови виникнення резонансного збудження:

$$t \ll T, l \ll \lambda, \omega \gg l, \quad (6)$$

де  $t$  – тривалість імпульсу опромінення;

$l$  – товщина шару радіопоглинаючого матеріалу,

а також визначити оптимальний діапазон частот можливого виникнення резонансу  $\omega$ .

Ефект циклотронного збудження металів (ефект Гантмахера) [3] спостерігається на частотах

$$\omega = \frac{eB}{\frac{\hbar^2}{2\pi} \cdot \frac{\partial A}{\partial E}}, \quad (7)$$

де:  $e$  – заряд атома ядра;

$B$  – напруженість магнітного поля;

$A$  – критична амплітуда власних коливань;

$E$  – напруженість електричного поля.

У формулі (7) знаменник характеризує інерційні властивості взаємодії атому і може бути замінений атомарною масою хімічного елемента, що чітко розмежовує резонансні частоти для кожного окремого елемента. Стійке резонансне збудження металів описане в літературі [3], спостерігалось і має практичне застосування за рахунок певних якостей, а саме:

- явний резонанс виникає внаслідок доволі високої амплітуди власних коливань;
- наявність власного скін-шару за рахунок вільних електронів;
- близьке співвідношення частоти власних коливань і сучасних генераторів, формуючих збуджуючий сигнал.

Інші хімічні речовини (діелектрики, оксиди, солі та луги металів, металеві властивості яких зменшуються за рахунок складних зв'язків у молекулярній структурі), вважалися нейтральними при взаємодії з НВЧ електромагнітними хвилями [3] із-за відсутності або слабого прояву якостей, що згадувалися вище. Але, якщо врахувати, що більшість діелектриків також має кристалічну структуру [4], то для них справедлива запропонована фізична модель енергетичної взаємодії. Слабкі резонансні властивості діелектриків і сполучень металів пояснюються малою амплітудою власних коливань, значною інерцією перерозподілу

енергії між еквівалентними коливальними системами. Для обґрунтування можливості резонансної взаємодії необхідно проаналізувати аналітичні залежності дифракції електромагнітних хвиль на атомній (молекулярній) структурі діелектрика. Слід зазначити, що діелектричні матеріали мають високі поглинаючі властивості.

Підсилення чи згасання, відповідно до законів Френеля, результуючого коливання (биття) можливе тільки внаслідок частотного резонансу. Але спостереження цього ефекту в лабораторних умовах ускладнюється за рахунок незначної амплітуди власних коливань елементарних частинок діелектриків. В зазначеному випадку особлива роль при резонансному збудженні речовини відводиться виконанню умов співпадання фаз коливань. По Френелю, різниця фаз визначається наступним чином:

$$\Delta\varphi = sr \sin \varphi, \quad (8)$$

де:  $s = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$ ;

$r$  – відстань від опромінювача до об'єкту;

$\varphi$  – кут опромінювання.

$\theta$  – фаза власних коливань атомів.

Амплітуди взаємодіючих коливань  $A_1$ ,  $A_2$  залежать від інтенсивності взаємодії падаючої хвилі з атомами. В даному випадку, коли розглядається явище дифракції, амплітуду атома можливо вважати пропорційною заряду ядра. За де Бройлем[5] під час інтерференції взаємодіючих коливань відбувається векторне складання амплітуд і результуюча резонансна амплітуда визначається як

$$A_p^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi, \quad (9)$$

а інтенсивність резонансного випромінювання визначається залежністю:

$$I = eU \cos \varphi. \quad (10)$$

Присутність в залежностях (9, 10) аргументу тригонометричної функції, що визначає умови фазового резонансу дозволяє стверджувати, що максимізація явища енергетичного збудження можлива тільки за умови  $\cos \varphi = 1$ , оскільки  $e$  та  $U$  відносно малі величини.

Сучасні літальні апарати зі штучно зменшеною площею віддзеркалення створюється за технологією заміни металів радіопоглинаючими матеріалами, що виправдовує себе більшою міцністю таких матеріалів. Існуючі способи радіолокації розраховані на когерентну взаємодію полів. При некогерентній взаємодії електромагнітні хвилі віддають свою енергію елементарним частинкам, переводячи їх у збуджений стан. При цьому виникають дебройлівські хвилі іншої довжини (іншого частотного діапазону).

Зважаючи на частотну залежність (11), енергія збудженого сигналу буде збільшувати свою концентрацію, оскільки площа поверхні радіопоглинаючого матеріалу виконуватиме функції апертури антени:

$$E = I\Delta S. \quad (11)$$

де:  $I$  – інтенсивність випромінювання енергії збудження;

$E = I\Delta S$  – площа поверхні радіопоглинаючого покриття.

$\Delta S$  – площа радіопоглинаючого покриття

Підводячи підсумок, слід зазначити, що запропонований підхід до проблеми локації літальних апаратів зі зменшеною площею віддзеркалення має практичну спрямованість, оскільки ставилося за мету розширити прикладну частину радіолокації за рахунок використання теорії квантової фізики.

### Висновки

Запропоноване тлумачення резонансного процесу взаємодії кристалічних структур з електромагнітними хвилями дозволяє зробити наступні висновки:

широковживані в сучасній практиці радіопоглинаючі екрани мають широку частотну діапазонність і високу ефективність, що підтверджується практикою експлуатації літальних апаратів зі штучно зменшеною площею віддзеркалення;

традиційні методи первинної і вторинної обробки радіолокаційної інформації не можливо вважати самодостатніми, оскільки вони ґрунтуються на концепції випромінюваної та прийнятої енергетики надпотужного зондуючого сигналу;

обґрунтування ефективних методів локації літальних апаратів зі штучно зменшеною площею віддзеркалення можливе за умови, якщо процеси взаємодії електромагнітних хвиль з радіопоглинаючими матеріалами розглядаються з точки зору квантових явищ;

локація літального апарату зі штучно зменшеною площею віддзеркалення ґрунтується на явищі створення штучних умов виникнення резонансного ефекту;

резонансний ефект виникає при виконанні необхідної умови – співпадінні частот – та достатньої умови – співпадінні фаз;

квантові явища виникнення резонансного ефекту достатньо досліджені для металів (ефект Гантмахера) і потребують детального вивчення для радіопоглинаючих діелектриків, а можливість створення провідного аномального скін-шару взагалі викликає практичну зацікавленість.

### Література

1. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат, 1989. – 346с.
2. Барщевский Б.У. Квантово-оптические явления. – М.: Высшая школа, 1982. – 136с.
3. Крекнел А., Уонг К. Поверхность Ферми. – М.: Атомиздат, 1978. – 340с.

4. Сиротин Ю.И., Таскольская М.П. Основы кристаллофизики. – М.: Наука, 1979. – 626с.
5. Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. Строение вещества. – М.: Высшая школа, 1978г. – 304с.

Отримано 14.11.2012 р.